

2. Rafiq A. et al. Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – V. 97. – P. 111-128.
3. Баян Е.М., Лупейко Т.Г., Пустовая Л.Е. Оптимизация синтеза порошковых наноразмерных материалов диоксида титана из пероксотитанового комплекса // *Химическая физика*. – 2019. – Т. 38. – № 4. С. 84-90.
4. Houas A., Lachheb H., Ksibi M., Elaloui E., Guillard C., Herrmann J.M. Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water // *Appl. Catal. B-Environ.* – 2001. – V. 31. P. 145-157.

МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ НА ПРИМЕРЕ

Р. НЕМАН

Волчек А.А.

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

E-mail: *Volchak@tut.by*

Аннотация: Изложены результаты исследования устойчивости выборочных оценок статистических параметров для различных отрезков исходного временного ряда годовых расходов воды р. Неман у г. Гродно за 1808 – 2018 гг. Рассмотрены интервалы, различающиеся степенью антропогенного воздействия на сток и типом атмосферной циркуляции. Сделан вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике годового стока р. Неман, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла.

Ключевые слова: река, сток, колебания, модель, прогноз.

LONG-TERM FLUCTUATIONS OF THE RIVER RUNOFF IN BELARUS ON THE NEMAN RIVER EXAMPLE

Volchak A.A.

Brest State Technical University

Abstract: The results of the stability of sample estimates study of statistical parameters for various segments of the initial time series of annual water runoff of the Neman River near the Grodno City for 1808 – 2018 are presented. The segments of the series differing in the degree of anthropogenic impact on the runoff and the type of atmospheric circulation are considered. It is concluded that there are statistically significant changes in the dynamics of the annual runoff of the Neman River due to both natural-climatic and anthropogenic changes in the hydrological cycle.

Keywords: river, runoff, oscillations, model, forecast.

Введение. В связи с тем, что все гидрологические и водохозяйственные расчеты основываются на гипотезе стационарности многолетних колебаний годового стока, что позволяет перенос основных гидрологических характеристик определенных по данным наблюдений в прошлом, на период эксплуатации водохозяйственного объекта в будущем в неизменном виде. Практика проектирования и эксплуатации гидротехнических и водохозяйственных объектов подтвердила возможность применения данного подхода. Тем не менее, описание многолетних колебаний речного стока основанных на статистической концепции в ее традиционной интерпретации не является перспективной при разработке методов прогнозирования стока [1]. Это обусловлено пределом предсказуемости стохастических моделей годового стока с помощью простой цепи Маркова, который составляет 1-2 годам при обеспеченности прогноза $\leq 60\%$ [2]. Кроме

того, климатические изменения последних лет и возрастающие антропогенные воздействия могут привести к изменению статистических параметров временных рядов стока в будущем.

Для анализа и прогноза годового стока перспективным являются многомерные эмпирико-статистические модели с использованием уравнений множественной регрессии в многомерном пространстве вектора-предиктора, выявленных в предшествующий период [1].

Поэтому анализ гидрологических рядов стока за многолетний период является необходимым условием при проектировании водохозяйственных объектов.

Материалы и методика исследования. Одна из задач исследования – оценка стационарности временных рядов годового стока рек с различной степенью антропогенной нагрузки. Для этого использовался временной ряд годовых расходов воды р. Неман у г. Гродно, одной из основных рек Беларуси. Неман является типичной трансграничной рекой Европы, протекающей по территории двух государств (Беларуси и Литвы) и может служить полигоном для оценки различных изменений режима стока. Длина исследуемого временного ряда составляет 211 лет (с 1808 по 2018 гг.). Она складывается из собственно наблюдений за 1877-2018 гг. и продленной, с помощью программного комплекса «Гидролог» [3, 4] части за 1808-1876 гг. с привлечением рек-аналогов (р. Неман у г. Смалининкай и р. Рейн) [5].

В табл. 1 представлены выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов годового стока. Эмпирические кривые обеспеченности для обоих периодов соответствуют распределению Пирсона III типа. Поскольку функция распределения вероятностей незначительно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез допустимо.

Таблица 1 – Основные статистические характеристики годового стока р. Немана

Годы	Период	Норма стока, \bar{Q} , м ³ /с	Коэффициенты		
			вариации C_v	асимметрии C_s	автокорреляции $r(1)$
1877-2018	142	195	0,18	0,86	0,17
1808-2018	211	193	0,19	0,65	0,19
1808-1876	69	191	0,21	0,41	0,23

Незначительное расхождение параметров рассматриваемых периодов позволяет считать их выборками из одной генеральной совокупности. Этот же вывод подтверждают результаты сравнения оценок выборочных средних и дисперсий рядов с использованием критериев Стьюдента и Фишера. Кроме того, коэффициент автокорреляции свидетельствует о статистически достоверной корреляции между стоком смежных лет ($r(1)=0,19$). Таким образом, использование временного ряда годовых расходов воды р. Неман у г. Гродно за 1808-2018 гг. вполне корректно.

На рис. представлен хронологический ход годовых расходов воды р. Неман в створе г. Гродно. Прослеживается некоторая цикличность колебаний: в период с 1867 по 1892 наблюдается спад водности с 1892 по 1931 гг. – увеличение водности, далее с 1931 по 1969 гг. – уменьшение водности, затем до начала текущего века наблюдается спад

водности с небольшим ростом в настоящее время. В 1958 г. произошел всплеск водности максимальный за весь период наблюдений. Наблюдается уменьшение размаха колебаний, начиная с 1960 г.

Анализ однородности рядов стока. Анализ устойчивости выборочных статистик при изменении периодов осреднения применительно к годовым расходам

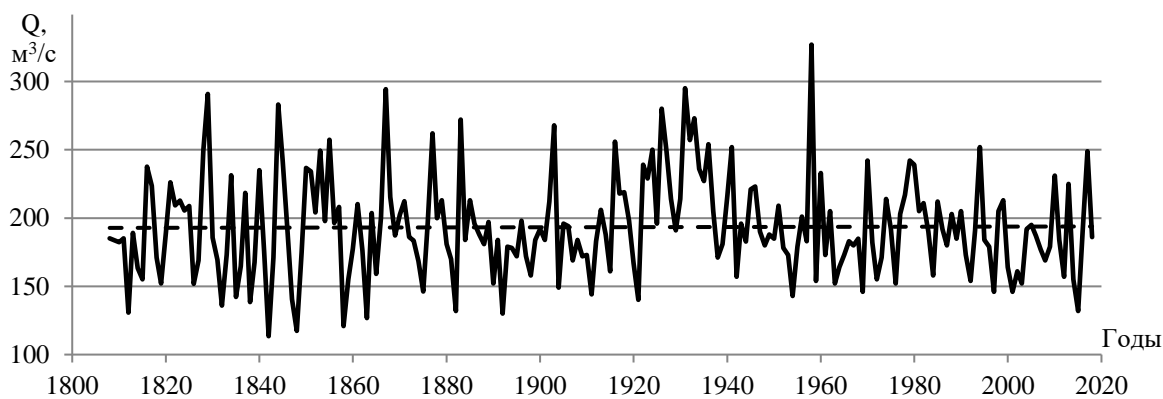


Рис. – Хронологический ход годового стока воды р. Неман в створе г. Гродно

воды р. Неман приведен в [5]. Рассмотрено три интервала исследуемого временного ряда: наблюдаемые величины, восстановленные и антропогенные (период массовых мелиораций). Показано, что нет оснований отвергать нулевую гипотезу и различия в средних величинах нужно признать несущественными, в то же время для дисперсий нулевая гипотеза может быть принята только между периодами 1808-1876 гг. и 1877-1964 гг. для других сочетаний нулевая гипотеза о равенстве дисперсий должна быть отвергнута. Размах колебаний годовых расходов воды в период с 1964 по 2018 гг. статистически значимо отличается от двух предыдущих в меньшую сторону. Различий в коэффициентах автокорреляции не установлено [5].

При изучении закономерностей многолетних колебаний речного стока интерес представляет совместный анализ динамики стока и обобщенных характеристик циркуляции атмосферы. В качестве последних использована классификация Г.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса, основанная на трех формах циркуляции *W* (западной), *E* (восточной) и *C* (меридиональной) [1]. В табл. 2 приведены связи годовых расходов р. Неман – г. Гродно с типом атмосферной циркуляции. Диапазон изменения

Таблица 2 – Статистические параметры годовых расходов воды р. Немана для различных периодов

Период	n, лет	Тип атмосферной циркуляции	Статистические параметры			
			$Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\sigma_{Q_{\text{ср}}}, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	$r(1)$
1881 – 1890	10	C	189	35,6	0,19	-0,38
1891 – 1928	38	W	194	35,0	0,18	0,26
1929 – 1939	11	E	228	37,7	0,17	0,47
1940 – 1948	9	C	202	27,0	0,13	-0,17
1949 – 1964	16	E+C	190	41,7	0,22	-0,26
1965 – 1988	24	E	193	26,7	0,14	0,12
1989 – 2010	22	W	184	26,7	0,15	0,14

характеристик годового стока весьма значителен и крайние его значения существенно больше (меньше) аналогичных значений для n -летних периодов исходного ряда.

Проверка гипотезы об однородности рассматриваемых параметров годового стока для периодов с разными типами циркуляции основана на использовании критериев Стьюдента и Фишера. Как показал анализ, для некоторых отрезков расхождения в параметрах существенны и могут быть признаны статистически достоверными. Подробная характеристика различий в рассматриваемых периодах приведена в табл. 2. По математическому ожиданию статистически различимы периоды: 1929-1939 гг. (тип атмосферной циркуляции – E) и 1965-1988 гг. (E); 1929-1939 гг. (E) и 1881-1890 гг. (C); 1929-1939 гг. (E) и 1891-1928 гг. (W); 1929-1939 гг. (E) и 1989-2010 гг. (W). Период 1929-1939 гг. (E) является самым многоводным периодом, поэтому он отличается от большинства других периодов, в том числе и 1965-1988 гг. (E) с аналогичным типом циркуляции. Рассматриваемые интервалы более разнородные по дисперсиям. Здесь наибольшая дисперсия наблюдается у периода 1949-1964 гг. (E+C), которая статистически различима со всеми из рассматриваемых периодов. Кроме того, статистически различимые дисперсии наблюдаются у периодов: 1929-1939 гг. (E) и 1881-1890 гг. (C); 1929-1939 гг. (E) и 1891-1928 гг. (W); 1989-2010 гг. (W) и 1940-1948 гг. (C); 1989-2010 гг. (W) и 1968-1988 (E). Различий в коэффициентах автокорреляции установить не удалось.

В то же время можно полагать, что для отдельных временных периодов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции выполняются условия стационарности. Переход же от одного состояния к другому происходит в естественных условиях под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейна.

Анализ цикличности рядов стока. Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний годового стока используется концепция цикличности. Сложность в использовании циклов для прогноза стока заключается в их аперiodичности. Кроме того, пока нет единого мнения о природе этих циклов: отсутствует объективная методика выделения и анализа циклов водности рек. Считается, что циклы обусловлены либо влиянием внешних, либо автоколебательными процессами в системе атмосфера-гидросфера Земли, либо естественными свойствами любой случайной последовательности.

По выборкам различной длины оценивались статистические параметры стока, которые различались начальной точкой и длиной. В частности, рассматривались отрезки ряда, различающиеся степенью антропогенного воздействия на сток и типом атмосферной циркуляции. Кроме того, определены статистические параметры для отрезков исходного ряда, полученные в результате процедуры скользящего 20-летнего, 30-летнего, 35-летнего и 50-летнего осреднения. Проверка однородности выборочных статистических параметров осуществлялась с помощью тестовых критериев Стьюдента и Фишера [6].

Крайние значения математического ожидания различных периодов осреднения имеет существенный размах. Это обусловлено многоводным периодом 20-40 годов XX столетия, что вносит в водность реки существенные различия. Сопоставление многолетних скользящих изменений средних и дисперсий показывает слабую синхронность в их изменениях. Наибольшая дисперсия отмечается в середине XIX столетия, тогда как средние значения стока в это время не были экстремальными. В тоже время многоводный период второй четверти XX столетия совпал с повышенной изменчивостью стока. Высокая изменчивость стока в 30-70-ые годы XX столетия приходится как на годы большой, так и малой водности. Отмечается определенная синхронность изменения скользящих дисперсий и векового хода солнечной активности. Максимумы векового цикла солнечной активности приходятся соответственно на 30-50-ые годы XIX-го и вторую половину XX столетия, а минимум – наконец XIX, начало XX столетия. Таким образом, изменчивость гидрологических характеристик возрастает при высокой солнечной активности.

Для обнаружения характерных ритмов, анализа их устойчивости или, наоборот, изменчивости во времени, использована процедура спектрально-временного анализа (СВАН) с длиной временного окна 50 лет. Анализ СВАН-диаграммы показал наличия квазидвухлетнего цикла в период 1925-1975 гг., мощного 6 летнего цикла во второй половине XIX столетия, 8 летнего цикла, выраженного особенно во второй половине XIX столетия и 10-50 годы XX столетия. Цикл близкий по длительности к 30-летнему (брикнеровскому) проявляется в 1900-1960 гг.

В связи с тем, что оба критерия дают сравнимые результаты, принцип цикличности (квазипериодичности) при анализе и прогнозе колебаний годового стока допустим.

Построение прогнозных моделей. Когда тренд явно не выражен, рассматривают совместно автокорреляционную (АКФ) и частную автокорреляционную (ЧАКФ) функции данного процесса, с помощью которых определяются характер изменения годового стока рек. Критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели даны в [1].

В нашем случае АКФ и ЧАКФ имеют значительную величину при $\tau=1$, тогда как все остальные значения их ординат статистически незначимы и характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений.

Так как, в колебаниях годовых расходов воды р. Неман установлена связь стока смежных лет, поэтому использована простая цепь Маркова для моделирования годовых расходов воды, представленная моделью AP (1) [1, 7, 8]. Для годовых расходов воды р. Неман при $r(1)=0,19$ и $Q_{cp}=193 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 1), модель имеет вида:

$$Q(t) = 0,19 \cdot Q(t-1) + 157 + \xi(t), \quad (1)$$

где $Q(t)$ и $Q(t-1)$, $\text{м}^3/\text{с}$ – годовые расходы воды в t -й и предшествующий ему $(t-1)$ -й годы; $\xi(t)$ – гауссовский «белый шум» с нулевым средним.

Первое слагаемое в правой части (1) можно трактовать как сток, обусловленный атмосферными осадками предшествующего года аккумулированных бассейном реки и

сбросом их в русло в данном году. При этом случайная составляющая $\xi(t)$ включает в себя и ту часть стока текущего года, которая сформирована за счет осадков этого года. Применительно к бассейну Немана для годовых расходов воды, м³/с, имеем:

$$Q(t) = 0,059 \cdot Q(t-1) + 0,493 \cdot W_{oc}(t) + 71,02 + \xi(r_1), \quad (2)$$

$$Q(t) = 0,205 \cdot W_{oc}(t) + 0,120 \cdot W_{oc}(t-1) - 9,173 + \xi(t_2), \quad (3)$$

где $W_{oc}(t)$ и $W_{oc}(t-1)$ – годовые осадки текущего и предшествующего годов.

Коэффициент множественной корреляции (2) – $R=0,48 > R^T_{(45, 5\%)}=0,29$, в интервал $\pm 5\%$ попало 40,4% всех точек; $\pm 20\%$ – 87,2%, а для (3) – $R=0,58 > R^T_{(45, 5\%)}=0,29$, в интервал $\pm 5\%$ попало 27,7% всех точек; $\pm 20\%$ – 93,6%.

Регрессионно-корреляционный анализ показал, что для построения сложной модели Маркова могут использоваться $Q(t-1)$; $Q(t-10)$ и $Q(t-37)$, частный вид модели:

$$Q(t) = 0,139 \cdot Q(t-1) + 0,195 \cdot Q(t-10) - 0,199 \cdot Q(t-37) + 169,0 + \xi(t), \quad (4)$$

$R=0,33 > R^T_{(144, 5\%)}=0,155$, в интервал $\pm 5\%$ попало 27,1% всех точек; $\pm 20\%$ – 84,3%.

Выводы. Проведенная оценка однородности основных статистических характеристик годовых расходов воды р. Неман в створе г. Гродно за более чем 200-летний период выявила наличие статистически значимых изменений, обусловленных как естественно-климатическими, так и антропогенными изменениями гидрологического цикла. При анализе закономерностей многолетних колебаний годового стока рек использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса рассматриваемого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических.

Список использованной литературы

1. Исмайллов Г.Х., Федоров В.М. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги / Водные ресурсы. 2001. Т. 28. №5. С. 517-525.
2. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. 255 с.
3. Волчек А.А. Автоматизация гидрологических расчетов / Водохозяйственное строительство и охрана окружающей Среды: Труды международной научно-практической конференции/ Брест. политехн. институт. – Биберах – Брест – Ноттингем, 1998. – С.55-59.
4. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Колебания годового воды р. Неман у г. Гродно / Водные ресурсы, 2006, том 33, №6. С. 635-663.
5. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Водный баланс речных водосборов Беларуси. – Минск: Тонпик, 2006 – 160 с.
6. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Е. Валуев, А.А. Волчек, П.С. Пойта, П.В. Шведовский. – Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
7. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Шведовский П.В. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов. – Брест: Изд-во БГТУ, 2004. – 301 с.
8. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А.А. Волчек, В.Н. Корнеев, С.И. Парфомук, И.А. Булак; под общ. ред. А.А. Волчек, В.Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.